KOMSENS-6G

Virtuell mehrlagige Antennensysteme basierend auf Multi-Mode Multi-Port (M^3PA) Antennen

Schlussbericht zum Teilvorhaben

Autoren: Tim Hahn, M. Sc., Hendrik Jäschke, M. Sc., Prof. Dr.-Ing. Dirk Manteuffel

FKZ: 16KISK127

Projektzeitraum: 15.11.2022 – 31.12.2025

Institute of Microwave and Wireless Systems

Leibniz Universität Hannover

Institut für Hochfrequenztechnik und Funksysteme

Appelstraße 9A

30167 Hannover

Gefördert durch:

Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt

Leibniz Universität Hannover

Dokumenteninformationen

Dateiname	KOMSENS-6G_LUH_Schlussbericht_v1_0.docx
Erstelldatum	08.06.2026
Druckdatum	23.06.2026
Anzahl Seiten	30

Inhaltsverzeichnis

1 Kurzdarstellung 4

1.1 Einordnung des Teilvorhabens in das Gesamtvorhaben 4

1.2 Ziele des Teilvorhabens 4

1.3 Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens 5

2 Ausgangssituation und Zielsetzung 6

2.1 Motivation und Problemstellung 6

2.2 Zielsetzung des Teilvorhabens 6

3 Projektstruktur und Arbeitspakete 7

3.1 Projektstruktur 7

3.2 Arbeitspaketstruktur 8

3.3 Zusammenarbeit im Konsortium 8

4 Ergebnisse der Arbeitspakete 9

4.1 AP1 – Management und Wissenschaftskommunikation 9

4.2 AP2 – Anwendungsfälle, Architektur, Standardisierung, Regulierung, Datenschutz 9

4.3 AP3 – Radio-Frontend und Basisband Architektur 10

4.4 AP6 – Experimentelle Analyse und Demonstratoren 19

5 Ergebnisse des Teilvorhabens 23

5.1 Erreichung der Ziele des Teilvorhabens 23

5.2 Zusammenwirken der Arbeitspakete 24

5.3 Demonstratoren und Validierungsergebnisse 25

6 Verwertung und Transfer 26

6.1 Wissenschaftliche Verwertung 26

6.2 Veröffentlichungen, Vorträge und Wissenstransfer 26

7 Fazit und Ausblick 27

7.1 Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse 27

7.2 Offene Fragestellungen und zukünftige Arbeiten 28

Literaturverzeichnis 29

Anhang 30

A Veröffentlichungen 30

B Messeauftritte und Demonstrationen 30

1 Kurzdarstellung

1.1 Einordnung des Teilvorhabens in das Gesamtvorhaben

Das Verbundprojekt KOMSENS-6G verfolgt das Ziel, zukünftige Mobilfunksysteme der sechsten Generation um integrierte Sensing-Funktionalitäten zu erweitern und damit die gemeinsame Nutzung von Kommunikations- und Sensing-Diensten (Integrated Sensing and Communication, ISAC) zu ermöglichen. Hierzu werden im Konsortium unterschiedliche Aspekte zukünftiger Mobilfunksysteme untersucht, die von der Definition relevanter Anwendungsfälle über Systemarchitekturen und Signalverarbeitungskonzepte bis hin zur Entwicklung und Validierung geeigneter Hardwareplattformen reichen.

Das Teilvorhaben der Leibniz Universität Hannover (LUH) ist innerhalb dieser Entwicklungskette auf die Erforschung von Antennen- und Front-End-Technologien ausgerichtet. Die Arbeiten adressieren die hardwareseitige Integration von Kommunikations- und Sensing-Funktionalitäten und leisten damit einen Beitrag zur Entwicklung zukünftiger ISAC-fähiger Mobilfunksysteme.

Die LUH beteiligt sich dabei an der Anforderungsanalyse, der Entwicklung technischer Lösungsansätze sowie deren experimenteller Verifikation. Damit bildet das Teilvorhaben die Schnittstelle zwischen der Definition systemtechnischer Anforderungen und deren Umsetzung auf Antennen- und Hardwareebene.

1.2 Ziele des Teilvorhabens

Ziel des Teilvorhabens war die Erforschung und Entwicklung neuartiger Antennen- und Front-End-Konzepte für zukünftige Mobilfunksysteme mit integrierter Kommunikations- und Sensing-Funktionalität. Hierzu wurde insbesondere die Nutzung von Multi-Mode Multi-Port Antennen (M^3PAs) untersucht, die mehrere entkoppelte Antennentore innerhalb eines gemeinsamen physikalischen Antennenelements bereitstellen.

Ein Schwerpunkt der Arbeiten lag auf der Entwicklung von M^3PA-basierten Antennenstrukturen sowie deren Integration in Antennenarrays. Die durch die zusätzlichen Moden bereitgestellten Freiheitsgrade sollten für Beamforming- und Sensing-Anwendungen nutzbar gemacht werden. Hierzu sollten geeignete Verfahren zur Strahlformung entwickelt und deren Potenzial für zukünftige ISAC-Systeme untersucht werden.

Darüber hinaus sollten die entwickelten Konzepte durch Simulationen, Hardwaredemonstratoren und experimentelle Untersuchungen verifiziert werden, um ihre praktische Umsetzbarkeit nachzuweisen.

1.3 Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Im Rahmen des Teilvorhabens wurden neuartige Antennenkonzepte auf Basis von Multi-Mode Multi-Port Antennen (M^3PAs) für den Einsatz in zukünftigen ISAC-Systemen entwickelt und untersucht. Hierzu wurde die Theorie charakteristischer Moden auf Aperturstrahler erweitert und angewandt, um entkoppelte Antennentore zu synthetisieren und zusätzliche modale Freiheitsgrade für die Strahlformung nutzbar zu machen.

Auf dieser Grundlage wurden M^3PA-basierte Arrayelemente, Verfahren zur modengewichteten Strahlformung sowie ein entsprechender Array-Demonstrator für den Millimeterwellenbereich entwickelt. Der hieraus resultierende 64-Port mmWave 4x4 M^3PA-Array-Demonstrator ist in Abb. 1 und Abb. 2 dargestellt. Die Untersuchungen zeigen, dass die zusätzlichen Freiheitsgrade der M^3PA-Architektur eine gezielte Anpassung der Strahlungseigenschaften ermöglichen, entkoppelte Antennentore für Sensing bereitstellen und damit neue Potenziale für Kommunikations- und Sensing-Anwendungen eröffnen.

Die entwickelten Konzepte wurden durch den Aufbau und die Vermessung von Demonstratoren experimentell validiert. Die Messergebnisse bestätigen die gute Übereinstimmung mit den zugrunde liegenden Simulationen und belegen die praktische Realisierbarkeit des entwickelten Ansatzes. Insbesondere konnte eine Strahlschwenkung bis zu Winkeln von etwa ±77° ohne sichtbare Grating Lobes nachgewiesen werden.

Die erzielten Ergebnisse leisten einen Beitrag zur Erforschung zukünftiger ISAC-fähiger Mobilfunksysteme und zeigen das Potenzial M^3PA-basierter Antennenarchitekturen für die gemeinsame Nutzung von Kommunikations- und Sensing-Funktionalitäten auf.

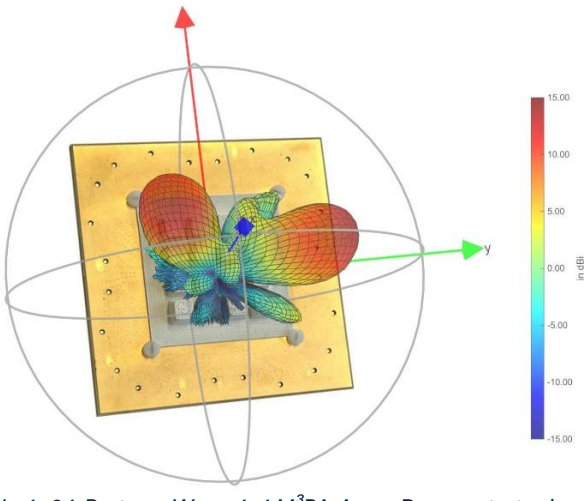


Abb. 1: 64-Port mmWave 4x4 M^3PA-Array-Demonstrator im ISAC-Szenario. Zwei orthogonal polarisierte, unabhängig steuerbare Array-Beams werden erzeugt. Diese sind getrennt für Kommunikation und Sensing nutzbar.

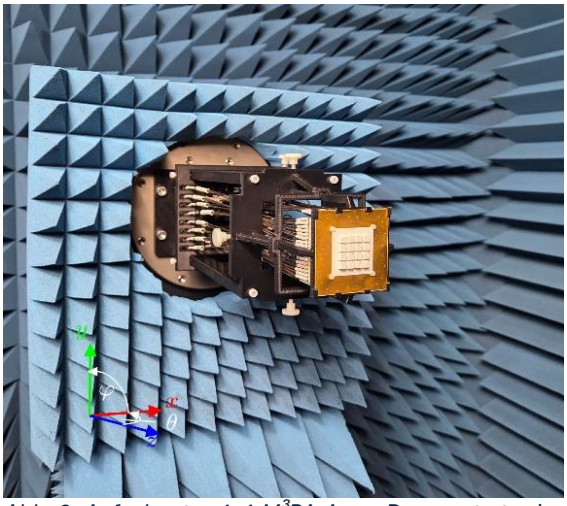


Abb. 2: Aufgebauter 4x4-M^3PA-Array-Demonstrator in der Antennenmesskammer von LUH.

2 Ausgangssituation und Zielsetzung

2.1 Motivation und Problemstellung

Mobilfunksysteme der bisherigen Generationen wurden primär für die drahtlose Kommunikation entwickelt. Mit dem Übergang zu Mobilfunksystemen der sechsten Generation (6G) entstehen jedoch neue Anforderungen, die über die reine Datenübertragung hinausgehen [1], [2]. Insbesondere die sensorische Erfassung der Umgebung mittels Mobilfunksignalen (Integrated Sensing and Communication, ISAC) wird als eine Schlüsseltechnologie zukünftiger Mobilfunknetze angesehen [3], [4], [5].

Die Fähigkeit, die Umgebung durch die vorhandene Kommunikationsinfrastruktur zu erfassen, eröffnet vielfältige neue Anwendungsfelder. Dazu zählen beispielsweise die Unterstützung digitaler Zwillinge in der industriellen Produktion, die Überwachung und Optimierung von Verkehrsströmen sowie die Bereitstellung kontextbezogener Informationen für industrielle und öffentliche Anwendungen. Darüber hinaus kann das gewonnene Umgebungswissen genutzt werden, um die Leistungsfähigkeit und Effizienz der Kommunikationsschnittstelle selbst zu verbessern.

Eine zentrale Herausforderung besteht darin, Sensing-Funktionalitäten nicht als separates Sensorsystem zu realisieren, sondern diese tief in die Mobilfunkinfrastruktur zu integrieren. Während heutige Lösungen häufig auf eigenständigen Sensorsystemen wie Radar beruhen und Kommunikationsnetze lediglich zur Datenübertragung nutzen, erfordert die Integration von Kommunikation und Sensorik die Anpassung verschiedener Komponenten des Mobilfunksystems. Dies betrifft sowohl die Systemarchitektur als auch die Signalverarbeitung, die Funkzugangstechnologien und die zugrunde liegenden Hardwareplattformen.

Vor diesem Hintergrund besteht ein erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um die technischen Grundlagen für integrierte Kommunikations- und Sensoriksysteme der sechsten Mobilfunkgeneration zu schaffen und deren Potenzial für zukünftige industrielle und gesellschaftliche Anwendungen nutzbar zu machen.

2.2 Zielsetzung des Teilvorhabens

Ziel des Teilvorhabens war die Untersuchung und Entwicklung von Antennen-Konzepten für Mobilfunksysteme mit integrierter Kommunikations- und Sensing-Funktionalität (Integrated Sensing and Communication, ISAC). Hierzu wurde der Einsatz von Multi-Mode Multi-Port Antennen (M^3PA) als Grundlage für rekonfigurierbare Antennensysteme betrachtet.

Ein Schwerpunkt lag auf der Synthese entkoppelter Antennentore zur Erhöhung der Isolation zwischen Sende- und Empfangspfaden, um die gleichzeitige Nutzung von Kommunikations- und Sensing-Funktionen im selben Frequenzbereich zu ermöglichen.

Darüber hinaus sollten Konzepte zur flexiblen Ansteuerung der rekonfigurierbaren Antennenstruktur zu virtuellen Sende- und Empfangsarrays untersucht werden.

Die entwickelten Ansätze sollten einen Beitrag zur Realisierung von Mobilfunksystemen mit Sensing-Funktionalität leisten und in Demonstratoren praktisch validiert sowie im Projektverbund erprobt werden.

3 Projektstruktur und Arbeitspakete

3.1 Projektstruktur

Das Gesamtvorhaben ist in sechs Arbeitspakete gegliedert, die die verschiedenen fachlichen und technischen Aspekte der Integration von Kommunikations- und Sensing-Funktionalitäten in zukünftige Mobilfunksysteme adressieren. Während AP1 projektübergreifende Management- und Wissenschaftskommunikationsaufgaben umfasst, behandelt AP2 die Definition von Anwendungsfällen sowie architektonische, regulatorische und datenschutzrelevante Fragestellungen. Die technischen Grundlagen und Lösungsansätze werden in den Arbeitspaketen AP3 bis AP5 entwickelt und untersucht. AP6 dient der experimentellen Analyse, Integration und Validierung der entwickelten Konzepte anhand von Demonstratoren.

Die Arbeitspakete bauen inhaltlich aufeinander auf und sind über definierte Schnittstellen miteinander verknüpft. Die in AP2 erarbeiteten Anforderungen und Randbedingungen bilden die Grundlage für die Entwicklung technischer Lösungsansätze in den nachfolgenden Arbeitspaketen. Die dort erzielten Ergebnisse fließen wiederum in die Demonstratoren und Validierungsaktivitäten in AP6 ein.

Die Interaktion der Arbeitspakete erfolgt durch den Austausch von Meilensteinen, welche den anderen Arbeitspaketen zur Verfügung gestellt werden.

Abb. 3 stellt die genannte Aufteilung des Gesamtprojekts in einzelne Arbeitspakete, sowie deren Schnittstellen grafisch dar.

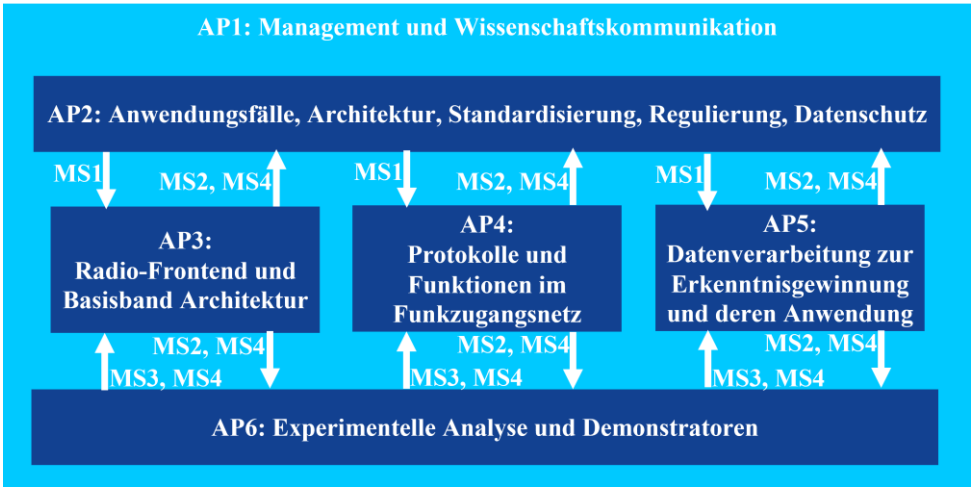


Abb. 3: Projektstruktur und Interaktion der Arbeitspakete

3.2 Arbeitspaketstruktur

Die LUH ist in die Arbeitspakete AP1, AP2, AP3 und AP6 eingebunden. Die Arbeiten erfolgen dabei entlang der projektweiten Entwicklungskette von der Anforderungsanalyse über die Entwicklung technischer Lösungsansätze bis hin zur experimentellen Validierung.

Im Rahmen von AP1 beteiligte sich die LUH an projektübergreifenden Management- und Wissenschaftskommunikationsaktivitäten. Zur Koordination der Arbeiten und zum kontinuierlichen Austausch innerhalb des Konsortiums erfolgten regelmäßige virtuelle und persönliche Besprechungen mit den Projektpartnern. Die Wissenschaftskommunikation umfasste insbesondere die Veröffentlichung wissenschaftlicher Ergebnisse in Fachzeitschriften sowie deren Präsentation auf nationalen und internationalen Konferenzen.

In AP2 wurden Anforderungen, Anwendungsfälle sowie architektonische, regulatorische und datenschutzrelevante Randbedingungen gemeinsam mit den Projektpartnern diskutiert und bewertet. Die daraus abgeleiteten Anforderungen bilden die Grundlage für die Forschungsarbeiten der LUH in AP3.

Der Schwerpunkt der Arbeiten in AP3 lag auf der Erforschung und Entwicklung neuartiger Antennen- und Front-End-Konzepte für Kommunikationssysteme mit integrierter Sensing-Funktionalität. Hierzu wurden Multi-Mode Multi-Port Antennen (M^3PA) zur Realisierung entkoppelter Antennentore untersucht und weiterentwickelt. Darüber hinaus wurden Beamforming-Verfahren für M^3PA-Arrays erforscht, um die gemeinsame Nutzung der Antennenstrukturen für Kommunikations- und Sensing-Anwendungen (ISAC) zu ermöglichen. Ergänzend erfolgten die Modellierung und Simulation der entwickelten Antennenkonzepte zur Analyse ihrer Eigenschaften sowie zur Bewertung ihrer Eignung für den Einsatz in zukünftigen Mobilfunksystemen.

Die in AP3 entwickelten Konzepte und Verfahren flossen anschließend in AP6 ein, wo sie im Rahmen von Demonstratoren und experimentellen Untersuchungen validiert wurden. Durch die Beteiligung an mehreren Arbeitspaketen leistete die LUH Beiträge zur Anforderungsdefinition, zur Entwicklung technischer Lösungsansätze sowie zu deren praktischer Erprobung und Bewertung.

3.3 Zusammenarbeit im Konsortium

Die Bearbeitung des Teilvorhabens erfolgte in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern des Konsortiums. Der regelmäßige fachliche Austausch diente der Abstimmung von Anforderungen, der Diskussion technischer Lösungsansätze sowie der Koordination der Arbeiten an den Schnittstellen zwischen den einzelnen Arbeitspaketen.

Zur Abstimmung der projektbezogenen Aktivitäten fanden während der Projektlaufzeit regelmäßige Konsortialtreffen, Arbeitspaketbesprechungen sowie themenspezifische

Abstimmungen statt. Diese wurden sowohl in virtueller Form als auch im Rahmen von Präsenzveranstaltungen durchgeführt. Die Treffen ermöglichten die kontinuierliche Abstimmung des Projektfortschritts, den Austausch von Ergebnissen sowie die gemeinsame Bewertung technischer Fragestellungen.

Insbesondere in den Arbeitspaketen AP2, AP3 und AP6 erfolgte eine enge Zusammenarbeit mit den beteiligten Projektpartnern, um Anforderungen und Randbedingungen abzustimmen, technische Konzepte aufeinander abzustimmen und die entwickelten Lösungsansätze in die Demonstratoren und Validierungsaktivitäten des Gesamtvorhabens zu integrieren.

4 Ergebnisse der Arbeitspakete

4.1 AP1 – Management und Wissenschaftskommunikation

AP1 umfasst die projektübergreifenden Aktivitäten in den Bereichen Management und Wissenschaftskommunikation. Während der gesamten Projektlaufzeit fanden regelmäßige Konsortialtreffen sowie arbeitspaketspezifische Abstimmungen statt. Die LUH beteiligte sich aktiv an den fachlichen Diskussionen und präsentierte Zwischenergebnisse in den relevanten Arbeitspaketen. Der kontinuierliche Austausch mit den Projektpartnern unterstützte die Abstimmung der Arbeiten sowie die Integration der erzielten Ergebnisse in das Gesamtvorhaben.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Verbreitung der im Projekt erzielten wissenschaftlichen Ergebnisse. Hierzu wurden Forschungsarbeiten in Fachzeitschriften veröffentlicht und auf nationalen sowie internationalen Konferenzen präsentiert. Darüber hinaus wurden wissenschaftliche Beiträge in Konferenzbänden publiziert und die erzielten Ergebnisse im Rahmen von Fachvorträgen auf Konferenzen vorgestellt.

Zur Förderung des Wissenstransfers und zur Sichtbarmachung der Projektergebnisse gegenüber Wissenschaft, Industrie und Öffentlichkeit beteiligte sich die LUH zudem an Demonstrationen auf Fachmessen und Projektveranstaltungen. Die dort präsentierten Demonstratoren ermöglichten die anschauliche Darstellung der entwickelten Technologien und unterstützten den Austausch mit potenziellen Anwendern und weiteren Interessengruppen.

Eine Übersicht der im Projekt entstandenen Publikationen, Vorträge und Demonstrationsaktivitäten ist im Anhang aufgeführt.

4.2 AP2 – Anwendungsfälle, Architektur, Standardisierung, Regulierung, Datenschutz

AP2 adressiert die Erarbeitung und Bewertung von Anwendungsfällen sowie die Analyse architektonischer, regulatorischer und datenschutzrelevanter Anforderungen für zukünftige Mobilfunksysteme mit integrierter Sensing-Funktionalität. Die LUH wirkte

hierbei an den fachlichen Diskussionen innerhalb des Konsortiums mit und brachte insbesondere Aspekte der praktischen Hardware-Implementierung sowie der technischen Umsetzbarkeit der betrachteten Anwendungsfälle ein.

Auf Basis ihrer Expertise im Bereich der Antennen- und Hochfrequenztechnik unterstützte die LUH die Bewertung der diskutierten Anwendungsfälle hinsichtlich ihrer Realisierbarkeit und der daraus resultierenden Anforderungen an die Hardwarearchitektur. Die gemeinsamen Abstimmungen dienten zudem dazu, Anforderungen und Randbedingungen für die im Projekt entwickelten Demonstratoren abzuleiten und deren Auslegung mit den vorgesehenen Anwendungsszenarien abzustimmen.

Die in AP2 gewonnenen Erkenntnisse und diskutierten Anforderungen flossen in die Arbeiten der LUH in AP3 ein und dienten als Grundlage für die Entwicklung und Bewertung der dort untersuchten Antennen- und Front-End-Konzepte.

4.3 AP3 – Radio-Frontend und Basisband Architektur

Der Schwerpunkt der Arbeiten der LUH lag in AP3, in dem die zentralen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des Teilvorhabens durchgeführt wurden. Ziel des gesamten Arbeitspakets war die Entwicklung und Untersuchung von Hardware- und Signalverarbeitungskonzepten für zukünftige Mobilfunksysteme mit integrierter Kommunikations- und Sensing-Funktionalität.

AP3 war in die beiden Task Groups T3.1 „RF Design“ und T3.2 „Signal Processing“ untergliedert. Die Arbeiten der LUH konzentrierten sich hierin ausschließlich auf T3.1 „RF Design“. Darüber hinaus übernahm die LUH die Leitung dieser Task Group und war für die Organisation regelmäßiger Synchronisationsmeetings zum Arbeitsstand, sowie die Koordination der zugehörigen Projektmeetings verantwortlich. Im Rahmen dieser Aktivitäten wurden die technischen Beiträge des Konsortiums diskutiert, Anforderungen abgestimmt und Lösungsansätze für die Realisierung der Hardwarearchitekturen innerhalb des Konsortiums erarbeitet.

Die Forschungsarbeiten der LUH fokussierten sich auf die Entwicklung und Untersuchung neuartiger Antennen-Konzepte für Kommunikationssysteme mit integrierter Sensing-Funktionalität. Insbesondere wurden hierzu Multi-Mode Multi-Port Antennen (M^3PAs) zur Realisierung entkoppelter Antennentore untersucht, da sie mehrere orthogonale und entkoppelte Antennenkanäle innerhalb eines gemeinsamen Elements bereitstellen [6], [7] und somit vielversprechende Voraussetzungen für zukünftige ISAC-Systeme bieten.

AP3 dient in erste Linie der Konzeptuntersuchung und dem Design von Antennenstrukturen basierend auf M^3PAs. Die innerhalb von AP3 entworfenen Konzepte wurden anschließend an AP6 transferiert, um die Demonstratoren zu fertigen und aufzubauen.

Die im Rahmen von AP3 erzielten wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse werden in den nachfolgenden Abschnitten dargestellt.

In AP3 wurden zwei Konzepte zur Realisierung von M^{3}PAs für ISAC-Szenarien seitens der LUH verfolgt. Einerseits wurden Apertur-Strahler zur Realisierung von M^{3}PAs durch eine Erweiterung der Theorie charakteristischer Moden untersucht. Andererseits wurden die bisher am Institut entwickelten M^{3}PAs basierend auf Patch-Antennen weiterentwickelt.

Der Fokus lag hierbei auf der Verringerung der Einzelelement Größe und der Nutzbarkeit im Antennenarray. Hierbei wurde der Ansatz verfolgt, die Elementgröße durch Nutzung eines Dielektrikums über einer Massefläche zu verringern. Dabei handelt es sich um eine Weiterentwicklung der bisher an der LUH entwickelten M^{3}PAs in Luft über einer Massefläche mit hoher Element-Größe.

4.3.1 64-Port mmWave M^{3}PA-Array-Demonstrator

Der Millimeterwellen-Frequenzbereich eignet sich aufgrund der großen verfügbaren Bandbreiten besonders für zukünftige Mobilfunksysteme der sechsten Generation. Neben hohen Datenübertragungsraten ermöglichen die großen Bandbreiten verbesserte Entfernungs-, Geschwindigkeits- und Winkelauflösungen für Sensing-Anwendungen, während Antennenarrays die Realisierung hochgerichteter Richtcharakteristiken und die Kompensation der erhöhten Freiraumdämpfung erlauben.

Hierzu wurde zunächst ein allgemeines Konzept für M^{3}PA-basierte Antennenarrays entwickelt. Im Gegensatz zu konventionellen Antennenelementen ermöglichen M^{3}PA-Strukturen die Anregung mehrerer orthogonaler Strom- beziehungsweise Feldverteilungen innerhalb eines einzelnen physikalischen Antennenelements. Die verschiedenen Moden weisen dabei unterschiedliche Abstrahlcharakteristiken auf und können über voneinander entkoppelte Antennentore gezielt angeregt werden. Durch die Nutzung dieser zusätzlichen Freiheitsgrade können die Strahlungseigenschaften einzelner Arrayelemente flexibel an unterschiedliche Betriebszustände angepasst werden. Dieser Vorgang ist in Abb. 3 dargestellt.

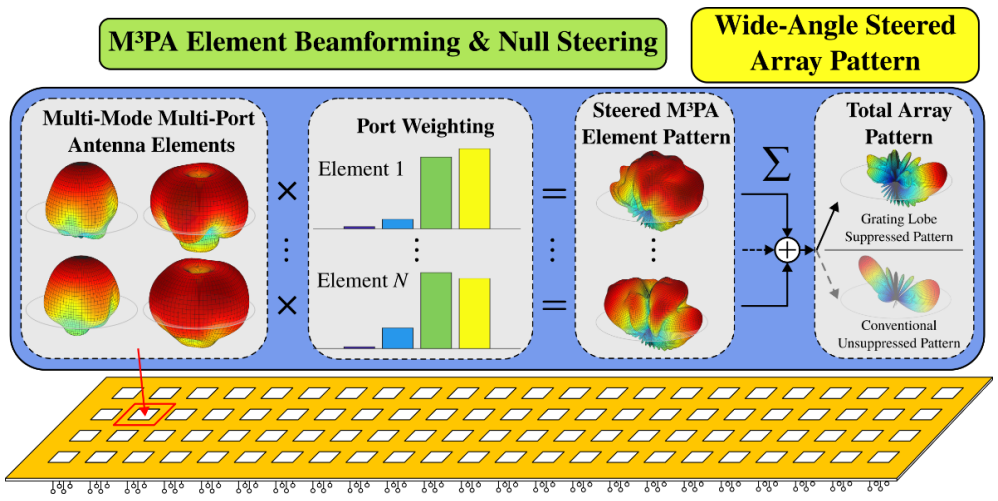


Abb. 4: Konzept des M^{3}PA-Array-Beamformings und der modengewichteten Strahlschwenkung.

Zur systematischen Analyse und Auslegung der Antennenelemente wurde die Theorie charakteristischer Moden auf Aperturstrahler angewendet und erweitert. Aufbauend auf den Dualitätsbeziehungen zwischen leitenden Strukturen und Aperturantennen wurden charakteristische Moden einer quadratischen Apertur analysiert und hinsichtlich ihrer Eignung für Kommunikations- und Sensing-Anwendungen bewertet.

Die Analyse der charakteristischen Moden zeigte, dass die dominanten Moden der betrachteten quadratischen Apertur unterschiedliche Strom- und Feldverteilungen aufweisen und dadurch verschiedene Strahlungscharakteristiken erzeugen. Während die fundamentalen Moden breitstrahlende Hauptkeulen entlang der Aperturnormalen erzeugen (Broadside Modes), weisen höhere Moden zunehmend außermittige Strahlungsmaxima auf (Off-Broadside Modes). Diese Eigenschaft ist insbesondere für großwinklige Strahlschwenkung von Interesse, da die einzelnen Moden bevorzugt Energie in unterschiedliche Raumrichtungen abstrahlen. Durch die gezielte Anregung und Überlagerung mehrerer Moden können die Strahlungseigenschaften der Antennenelemente daher flexibel angepasst und zusätzliche Freiheitsgrade für die Strahlformung erschlossen werden. Die zur Realisierung der Apertur-Antenne ausgewählten Moden, sowie deren Richtcharakteristiken sind in Abb. 5 und Abb. 6 dargestellt.

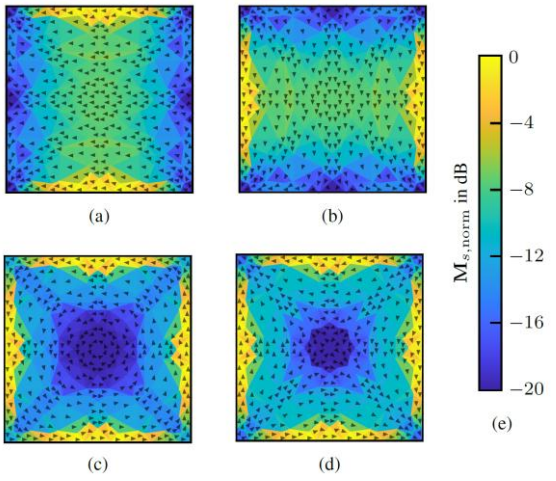


Abb. 5: Charakteristische magnetische Stromverteilungen der Apertur.

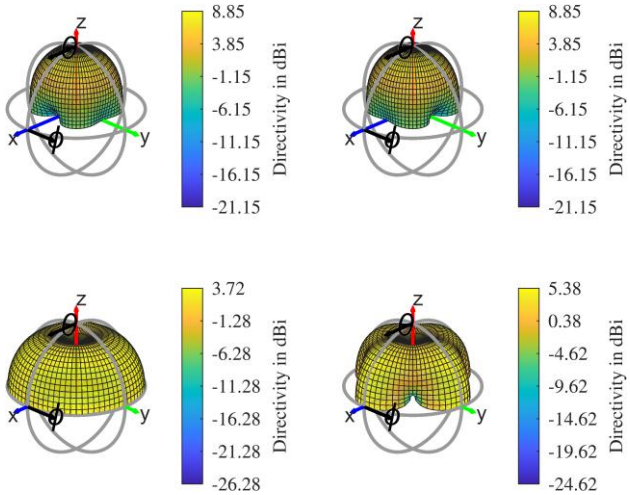


Abb. 6: Richtdiagramme der äquivalenten Stromverteilungen der Apertur.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde ein M^{3}PA-Antennenelement für das Mobilfunkfrequenzband n257 ($26.5\ \mathrm{GHz} \leq f \leq 29.5\ \mathrm{GHz}$) entwickelt. Die Struktur basiert auf einer quadratischen Apertur mit integrierten Speisepunkten (Feeds), die die gezielte Anregung mehrerer orthogonaler Moden ermöglichen. Zur Verbesserung des Übergangs von der dielektrisch gefüllten Apertur an den Freiraum wurde die Antenne durch eine angepasste Superstrat-Struktur ergänzt. Darüber hinaus wurden geeignete Speisenetzwerke entwickelt, welche die erforderlichen Amplituden- und Phasenbeziehungen zur selektiven Modenanregung bereitstellen und in die Antenne integriert.

Besonderes Augenmerk lag dabei auf einer geringen Kopplung zwischen den einzelnen Antennentoren sowie einer kompakten Integration in Leiterplattentechnologie. Das hieraus entwickelte Apertur-basierte M^{3}PA-Einzelelement ist in Abb. 7 dargestellt.

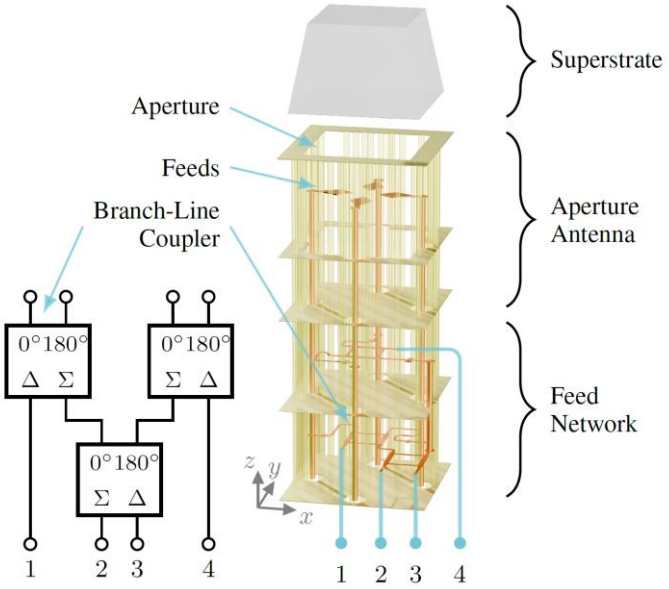


Abb. 7: Explosionsdarstellung der Apertur-Antenne, integriert in eine Mehrlagen-Leiterplatte (PCB). Die Apertur ist mit einem Superstrat abgedeckt. Das Speisenetzwerk ist unter die Antennenstruktur in das PCB integriert.

Neben der Entwicklung der Antennenelemente wurde ein neuartiger Beamforming-Ansatz für M^{3}PA-Arrays untersucht. Im Gegensatz zu klassischen Phased-Array-Systemen erfolgt hierbei nicht nur die Optimierung der Phasenlage zwischen den Antennenelementen, sondern zusätzlich die Anpassung der Modenanregung innerhalb der einzelnen Arrayelemente. Hierdurch können die Strahlungscharakteristiken der Elemente gezielt an die gewünschte Strahlschwenkrichtung angepasst werden. Für die Bestimmung der optimalen Anregungsgewichte wurde ein Optimierungsverfahren entwickelt, das die Korrelation zwischen einem vorgegebenen Zielstrahl und dem resultierenden Arraystrahl maximiert [8].

Zur Validierung der entwickelten Konzepte wurde ein Antennenarray auf Basis der entwickelten M^{3}PA-Elemente entworfen und aufgebaut. Das Array besteht aus 16 Antennenelementen in einer 4×4-Anordnung. Da jedem Element des Arrays insgesamt vier Antennentore zur Verfügung stehen, ergibt sich somit eine gesamte Portanzahl von $N_{\mathrm{Ports}} = 4 \times 4 \times 4 = 64$. Die gewählte Arrayarchitektur ermöglicht somit eine hohe Anzahl unabhängiger Freiheitsgrade und dient als Forschungsplattform zur Untersuchung neuartiger Beamforming- und Strahlschwenkverfahren für ISAC-Anwendungen.

Die einzelnen Antennenelemente wurden so ausgelegt, dass mehrere charakteristische Moden über voneinander entkoppelte Speiseports angeregt werden können. Hierfür wurde eine kompakte Mehrport-Speisestruktur entwickelt, die die selektive Anregung der verschiedenen Moden innerhalb eines gemeinsamen Antennenelements ermöglicht. Die Draufsicht der so realisierten Antenne ist in Abb. 8 dargestellt.

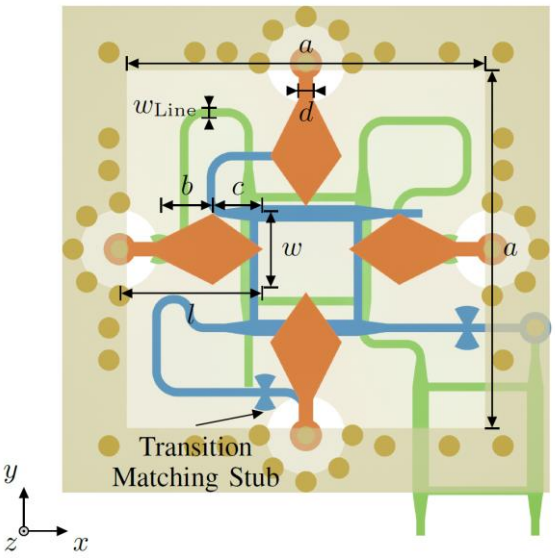


Abb. 8: Speisestruktur zur Anregung der äquivalenten Apertur-Stromverteilungen.

Das Modell des vollständigen Array-Demonstrators wurde in Mehrlagen-Leiterplattentechnologie realisiert und ist in Abb. 9 dargestellt. Neben den Antennenelementen wurden auch die erforderlichen Speisenetzwerke, Signalverteilungsstrukturen und Übergänge in die Leiterplattenarchitektur integriert. Die entwickelte Leiterplatte ermöglicht die individuelle Ansteuerung sämtlicher M^{3}PA-Ports und bildet damit die Grundlage für die experimentelle Untersuchung modengewichteter Beamforming-Verfahren.

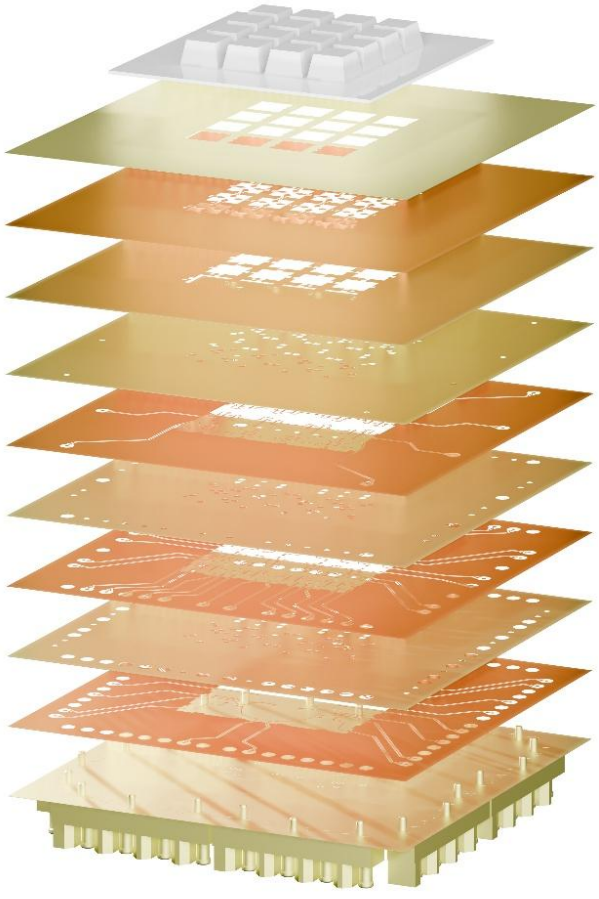


Abb. 9: Explosionsdarstellung des 4×4-M^{3}PA-Arrays in Mehrlagen-Leiterplattentechnologie.

Die durchgeführten Simulationen zeigten, dass durch die Kombination aus M^{3}PA-Elementen und modenspezifischer Strahlformung eine deutliche Erweiterung des nutzbaren Schwenkbereichs gegenüber konventionellen Antennenarrays erreicht werden kann. Insbesondere erlauben die zusätzlichen Freiheitsgrade eine gezielte Anpassung der Elementcharakteristiken an große Schwenkwinkel sowie die Unterdrückung unerwünschter Nebenkeulen und Grating Lobes. Damit wurde ein vielversprechender Ansatz für zukünftige Kommunikations- und Sensing-Systeme mit großem Sichtfeld und hoher räumlicher Auflösung entwickelt.

Nach erfolgreich abgeschlossener Konzeptionsphase innerhalb von AP3 wurden die Ergebnisse an AP6 transferiert, um den Demonstrator praktisch aufzubauen und zu vermessen.

4.3.2 Entwicklung modaler Beamforming-Verfahren für M^{3}PA-Arrays

Neben der Entwicklung der Antennenstruktur wurde ein Beamforming-Verfahren für M^{3}PA-basierte Antennenarrays entwickelt. Im Gegensatz zu konventionellen Phased-Array-Systemen stehen bei M^{3}PA-Arrays zusätzliche Freiheitsgrade in Form mehrerer charakteristischer Moden pro Antennenelement zur Verfügung.

Ziel der Arbeiten war die Entwicklung eines Verfahrens, das diese modalen Freiheitsgrade gezielt in die Strahlformung einbindet. Hierzu wurde ein Optimierungsansatz entwickelt, bei dem die Anregungsgewichte der einzelnen Moden gemeinsam mit den Arraygewichten bestimmt werden. Dadurch können sowohl die Strahlungseigenschaften der einzelnen Antennenelemente als auch die resultierende Arraycharakteristik gezielt beeinflusst werden.

Zur Bestimmung der optimalen Anregungsgewichte wurde ein Optimierungsverfahren entwickelt, welches die Übereinstimmung zwischen einem vorgegebenen Zielstrahl und dem resultierenden Arraystrahl maximiert. Der entwickelte Algorithmus zur Berechnung der Beamforming-Gewichte für M^{3}PA-Arrays ist in [8] beschrieben und bildet die Grundlage für die in AP6 durchgeführten experimentellen Untersuchungen.

4.3.3 M^{3}PA-Array-Demonstrator für das obere 6-GHz-Frequenzband

Dieser Demonstrator wurde mit dem Ziel designt herkömmliche Antennen an Basisstationen in der zukünftigen sechsten Mobilfunkgeneration zu ersetzen und die Kommunikationsfähigkeit im Rahmen von ISAC um die Sensing-Funktionalität zu erweitern. Entsprechend kann ein $120°$-Sektor bezüglich der horizontaler Winkelabdeckung von diesem Array abgedeckt werden, wie es bei aktuellen Basisstationsantennen der Fall ist. Der Frequenzbereich von Interesse ist das obere 6-GHz-Frequenzband ($6\ \mathrm{GHz} \leq f \leq 7.125\ \mathrm{GHz}$) mit einer Mittenfrequenz von $f_0 = 6.8\ \mathrm{GHz}$ zur Abdeckung von Kommunikations- und Sensing-Szenarien im mittleren Distanzbereich.

Das Antennenkonzept basiert auf Mikrostreifen-Antennen mit einem geerdeten Dielektrikum. Als Dielektrikum wird RO4003C als Kernmaterial genutzt mit einer relativen Permittivität von $\varepsilon_r = 3.55$. Die Dicke des Dielektrikums (der Abstand zwischen Antennenelement und Massefläche) wird zu $h = 4.167\ \mathrm{mm}$ gesetzt. Bei der Mittenfrequenz f_0 entspricht dies $h \approx 0.18\lambda_r$, wobei λ_r die Wellenlänge im Substrat

darstellt. Dieser große Abstand ist notwendig zur Anregung der vier gewünschten Moden und zur Realisierung der geforderten Bandbreite.

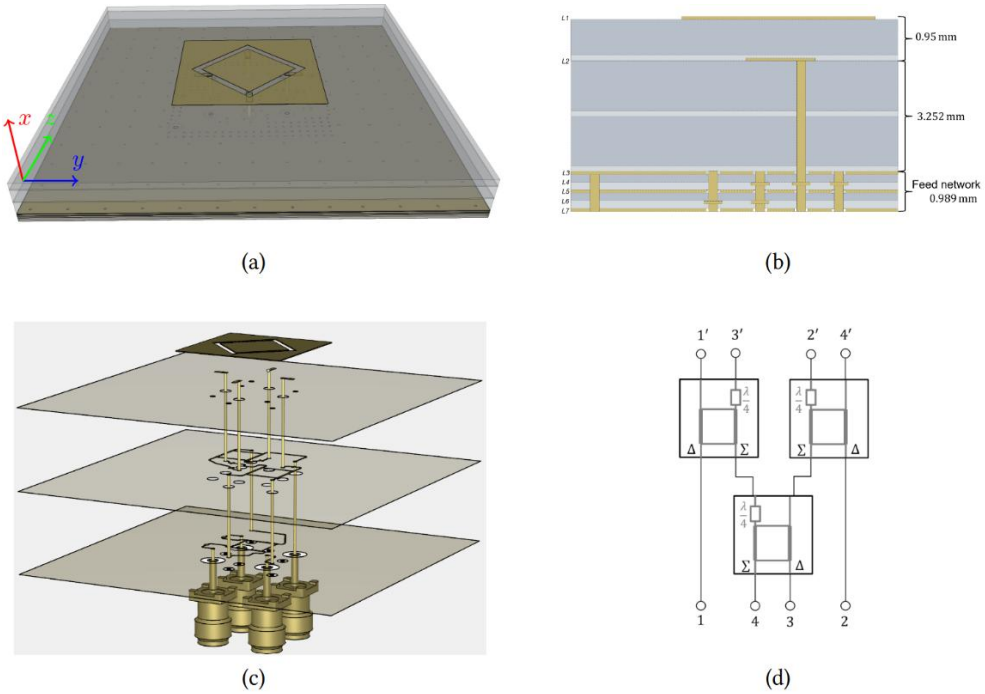
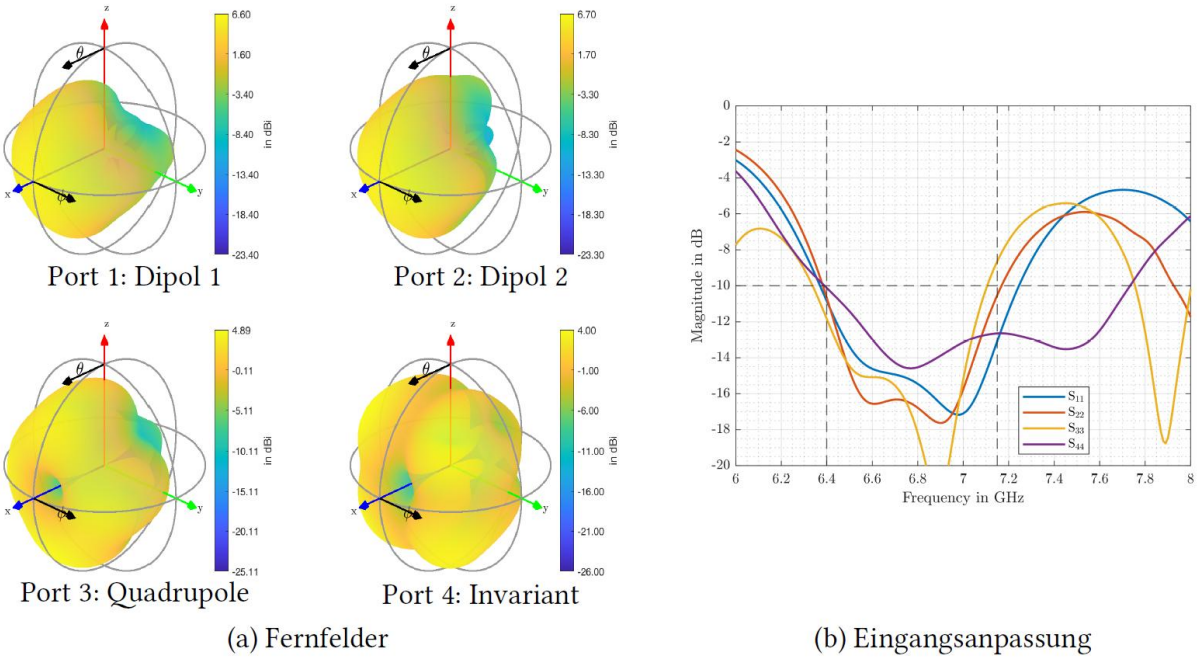


Abb. 10: Vier-Port Multi-Moden Antenne. (a) Simulationsmodell. (b) Stack-Up. (c) Explosionsdarstellung. (d) Speisenetzwerk.

Ein Modell des finalen designten Einzelelements ist in Abb. 10 dargestellt. Das Antennenelement (in der obersten Lage) hat eine Kantenlänge von $19.6\ \mathrm{mm} \times 19.6\ \mathrm{mm}$, dies entspricht circa $0.45\lambda_0 \times 0.45\lambda_0$ bei Mittenfrequenz f_0. In Abb. 10 (a) ist das Simulationsmodell inklusive des genutzten Koordinatensystems veranschaulicht. Abb. 10 (b) zeigt den Stack-Up der Leiterplatte. Letzterer setzt sich aus dem $h = 4.167\ \mathrm{mm}$ dicken Substrat mit darunter liegenden Lagen zur Realisierung des Speisenetzwerkes (L3 bis L7) zusammen. Das Speisenetzwerk ist in der Explosionsdarstellung des Elements in Abb. 10 (c) verdeutlicht, Abb. 10 (d) zeigt ein Schaltbild des Speisenetzwerkes.

Das an einem Antennenport eingespeiste Signal wird gemäß des Speisenetzwerkes – bestehend aus drei 90°-Hybridkopplern – amplituden- und phasenrichtig auf die vier Speisepunkte aufgeteilt. Diese enden unterhalb des eigentlichen Antennenelements, sind mit Vias kontaktiert und koppeln kapazitiv auf das Element über. Derart wird je nach gewähltem Port die gewünschte Stromverteilung auf dem Antennenelement angeregt.

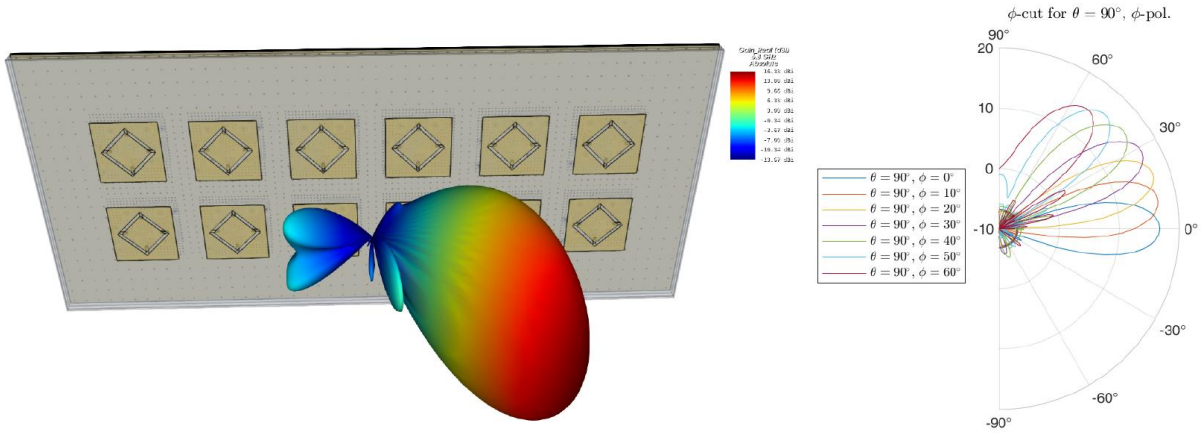
Die resultierenden Fernfeld-Richtdiagramme der vier Ports sind in Abb. 11 (a) gezeigt.



(a) Fernfelder (b) Eingangsanpassung

Abb. 11: In (a) sind die „Realized-Gain“ Fernfeld-Richtcharakteristiken der simulierten M³PA gezeigt, (b) zeigt die Eingangsanpassung der Ports in Form von Streuparametern.

Port 1 und Port 2 regen hierbei die beiden orthogonal polarisierten Dipol-Moden an, die eine „Broadside“-Richtwirkung mit einem maximalen „Realized-Gain“ von $G_{\mathrm{r,max}} \approx 6.6$ dBi aufweisen. Port 3 regt einen Quadrupole-Mode mit $G_{\mathrm{r,max}} \approx 4.9$ dBi und Port 4 den Invariant-Mode mit $G_{\mathrm{r,max}} \approx 4$ dBi an. Die Anpassung der vier Ports ist in Abb. 11 (b) gezeigt. Alle Ports sind nahezu in dem gesamten oberen 6-GHz-Frequenzband angepasst ($|S_{ii}| \leq -10$ dB). Aus diesem Einzelelement wird ein Array bestehend aus 6×2 Elementen realisiert. Das designte Array ist in Abb. 12 (a) veranschaulicht.



(a) Array-Modell (b) Richtcharakteristiken

Abb. 12: In (a) ist das designte Antennenarray abgebildet. Exemplarisch für $\theta = 90°$ und $\phi = 40°$ ist die „Realized-Gain“ Richtcharakteristik dargestellt. Für verschiedene Schwenkwinkel ϕ sind die zugehörigen Richtdiagramme zweidimensional für $\theta = 90°$ in (b) visualisiert.

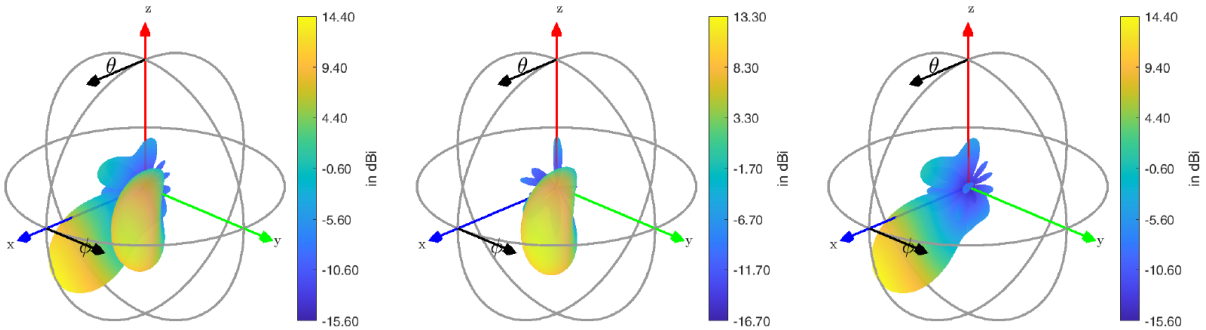
Die Inter-Element Distanz zwischen den Elementen ist zu $d = 28.5$ mm ($0.65\lambda_0$ bei f_0) gesetzt und die totale Größe des Arrays beträgt $A = 201$ mm $\times$ 87 mm. Exemplarisch ist

in Abb. 12 (a) eine mit dem Array erzeugte geschwenkte Antennenkeule für $\theta = 90°$ und $\phi = 40°$ gezeigt. Diese Keule wird realisiert durch kombinierte Anregung aller Ports des Antennenarrays, wobei die Ports mit Koeffizienten gewichtet überlagert werden. Die Koeffizienten werden für die gewünschte Schwenkrichtung mittels eines Manifold-Optimierungsalgorithmus berechnet, um einerseits den Strahl in die gewünschte Richtung zu schwenken und um andererseits andere unerwünschte Keulen zu minimieren. Der maximale Array-Antennengewinn der Keule in gewünschter Richtung liegt bei $G_{r,max} \approx 16.3$ dBi und Nebenkeulen sowie eine mögliche „Grating-Lobe“ sind erfolgreich um mindestens 19 dBi gedämpft.

Letzteres ist eines der Vorteile von M^{3}PA-Arrays: Insbesondere durch Nutzung von „Off-Broadside“-Moden können Nebenkeulen und „Grating-Lobes“ gezielt unterdrückt werden. Dies wird derart realisiert, dass die Richtcharakteristik des Einzelzements gezielt manipuliert wird, um in die Richtung unerwünschter Keulen die Direktivität zu minimieren. Für verschiedene Schwenkwinkel ist zweidimensional in der xy-Ebene die Richtcharakteristik in Abb. 12 (b) aufgezeigt. Die Keule wird hierbei von $\phi = 0°$ in 10°-Schritten bis $\phi = 60°$ geschwenkt (bei $\theta = 90°$). Insgesamt wird mit diesem Array ein Winkelbereich von $-60° \leq \phi \leq 60°$ abgedeckt. Unerwünschte Keulen, die nicht in Hauptstrahlrichtung zeigen, werden um mindestens 12 dB unterdrückt.

In vertikaler Richtung besteht das Array aus zwei Elementen. Damit ist der vertikale Schwenkbereich der Hauptkeule limitierter als der horizontale, wie es bei konventionellen Basisstationsantennen auch der Fall ist. In vertikaler Richtung lässt sich mit dem Array die Keule um $\Delta\theta \approx 30°$ gegenüber der „Broadside“-Richtung schwenken.

Dies ist in Abb. 13 illustriert, in der exemplarisch zwei Antennenkeulen mit dem Array realisiert sind.



(a) Betrag (b) ϕ-Polarisation (b) θ-Polarisation

Abb. 13: Realisierung zweier Hauptkeulen mit dem designten 6 × 2-Array. Die eine Keule ist ϕ-polarisiert ($\theta = 90°$ und $\phi = 40°$), die andere Keule ist θ-polarisiert ($\theta = 120°$ und $\phi = 0°$). In (a) ist die Betrags-Richtcharakteristik dargestellt, (b) bzw. (c) zeigen das Richtdiagramm für ϕ- bzw. θ-Polarisation.

Die ϕ-polarisierte Hauptkeule ist vergleichbar mit der Charakteristik in Abb. 12 (a)Abb. 13 und zeigt in $\theta = 90°$ und $\phi = 40°$ Richtung. Die θ-polarisierte Hauptkeule ist in $\theta = 120°$ und $\phi = 0°$ Richtung geschwenkt. Die Realisierung mehrerer stark richtender Hauptkeulen unter Minimierung unerwünschter Nebenkeulen ist mit diesem Array

möglich. Insbesondere die gleichzeitige Adressierung mehrerer Nutzer ist hierfür ein realistischer Anwendungsfall.

4.4 AP6 – Experimentelle Analyse und Demonstratoren

Die in AP3 entwickelten Antennen- und Beamforming-Konzepte wurden im Rahmen von AP6 experimentell untersucht und validiert. Ziel der Arbeiten war die praktische Verifikation der entwickelten M^{3}PA-basierten Antennenarchitektur sowie die Bewertung ihrer Eignung für zukünftige Kommunikations- und Sensing-Systeme im Millimeterwellenbereich.

Hierzu wurde das entwickelte Antennenkonzept zunächst auf Einzelelementebene realisiert und charakterisiert und anschließend ein vollständiger Array-Demonstrator aufgebaut und messtechnisch untersucht. Die experimentellen Untersuchungen umfassten sowohl die Analyse der einzelnen Antennenports als auch die Bewertung des vollständigen Arrays hinsichtlich seiner Strahlungs- und Strahlschwenkeigenschaften. Besonderes Augenmerk lag dabei auf dem Vergleich zwischen Simulationen und Messergebnissen, um die entwickelten Modelle und Entwurfsverfahren zu verifizieren.

Die Antennendemonstratoren wurden in PCB-Technologie gefertigt. Das designte PCB besitzt insgesamt 10 Lagen und verwendet verschiedene Backdrills zur Realisierung der Layer-Transitions. Als Basismaterial kommt das Panasonic Megtron6 zum Einsatz, welches geringe Verluste für Hochfrequenzanwendungen bietet. Der resultierende Stack-Up des designten PCBs ist in Abb. 14 dargestellt.

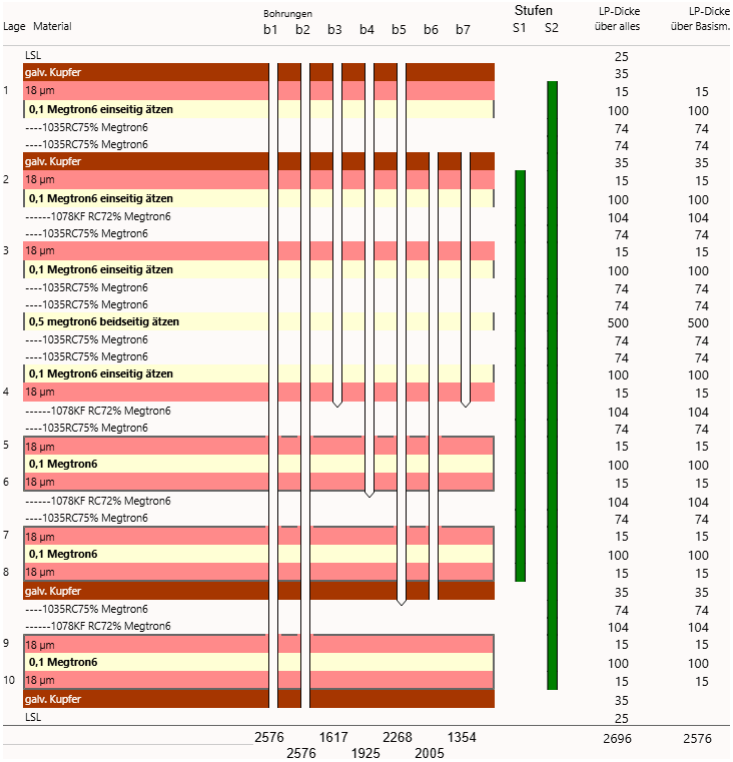


Abb. 14: Stack-Up des PCBs der Antennendemonstratoren.

Das Superstrat wurde mithilfe eines 3D-Druckers im FDM-Verfahren gefertigt. Hierzu wurde das Zetamix-ε-4.5-Substrat als Basisfilament verwendet. Zur Einspeisung der Eingangssignale werden Multi-Port Mini-Coax Konnektoren der Firma Rosenberger verwendet.

Zur Validierung des entwickelten Antennenkonzepts wurde zunächst ein einzelnes M^{3}PA-Antennenelement gefertigt und experimentell untersucht. Die Messungen dienten der Verifikation der in AP3 entwickelten charakteristischen Moden sowie der zugehörigen

Strahlungscharakteristiken. Abb. 15 zeigt den gefertigten Einzelelement-Demonstrator mit allen montierten Komponenten.

(a) (b)

Abb. 15: Gefertigter Einzelelement-Demonstrator. (a) Frontansicht. (b) Rückansicht.

Die einzelnen Antennenports wurden separat charakterisiert und ihre Antennendiagramme mit den Simulationen verglichen. Hierbei konnte die erfolgreiche Anregung der vorgesehenen charakteristischen Moden nachgewiesen werden. Der Vergleich zwischen den gemessenen und simulierten Strahlungscharakteristiken ist in Abb. 16 dargestellt. Die Messungen bestätigen die gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung und zeigen die unterschiedlichen Abstrahlcharakteristiken der einzelnen Moden, welche die Grundlage für die in AP3 entwickelten modalen Beamforming-Verfahren bilden.

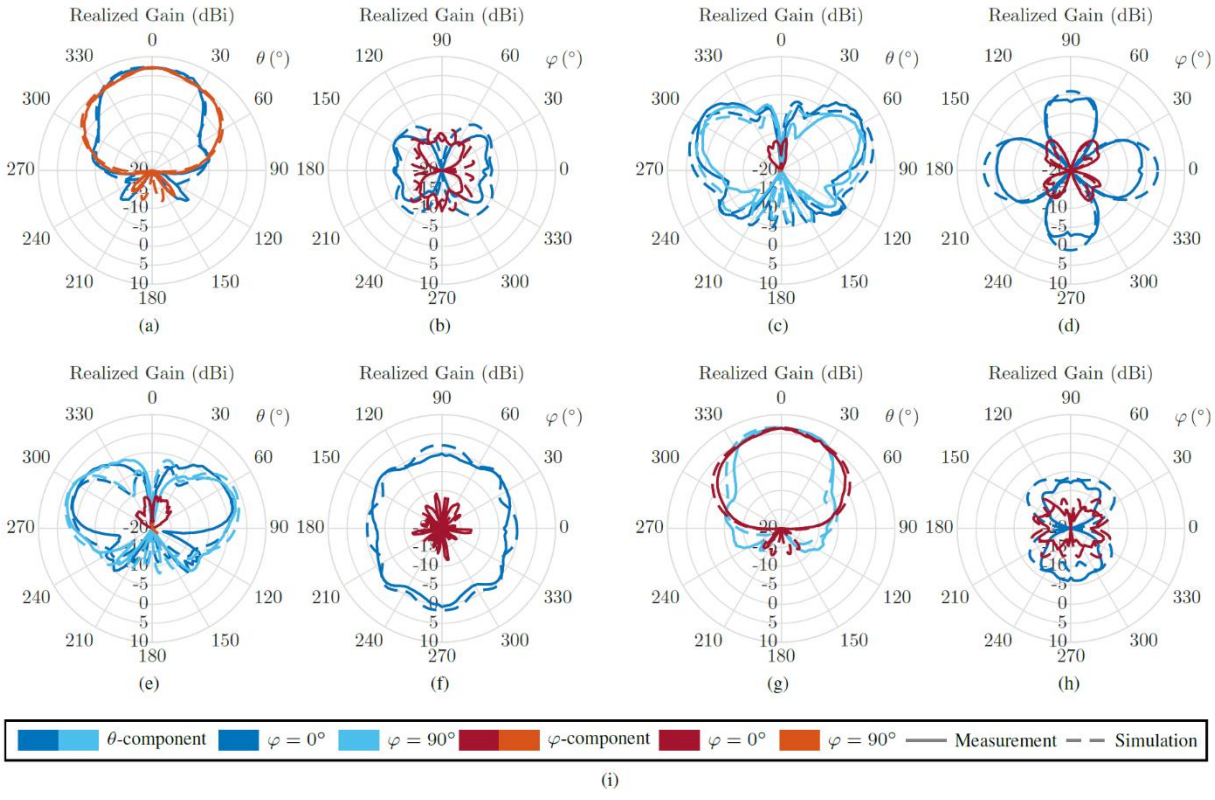
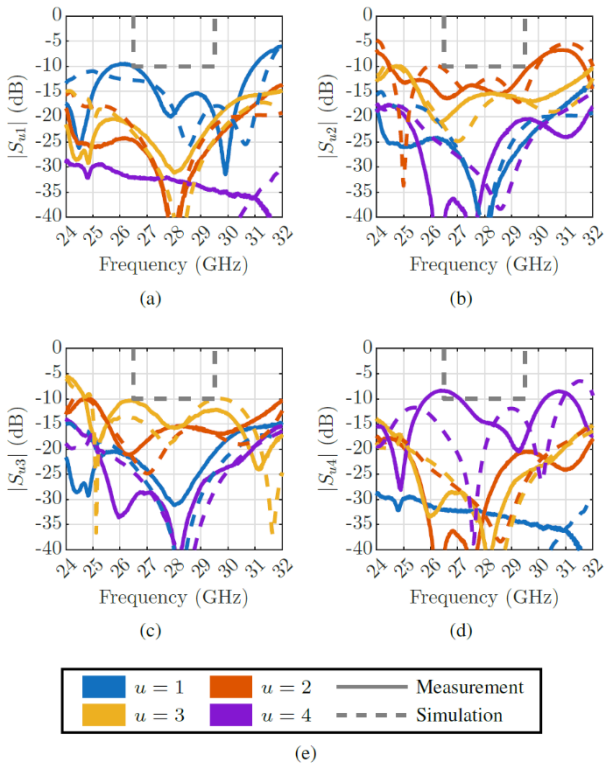


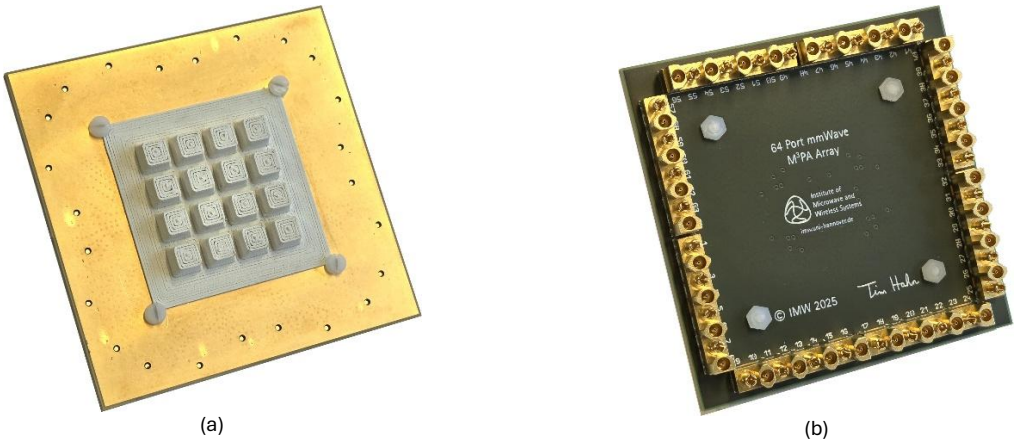
Abb. 16: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Strahlungscharakteristiken der Einzelelement M³PA. (a) – (b) Port 1. (c) – (d) Port 2. (e) – (f) Port 3. (g) – (h) Port 4. (i) Legende.



Darüber hinaus wurden ebenfalls die Streuparameter des gefertigten Elementdemonstrators vermessen. Diese weisen eine gute Anpassung im Zielfrequenzbereich auf ($|S_{uu}| \leq -10$ dB) und sowie sehr niedrige Verkopplungen der Antennenports, wobei Ports 2 und 3 eine maximale Verkopplung von $|S_{23}| = -16$ dB aufweisen und alle anderen Ports weit unter $|S_{uv}| \leq -20$ dB liegen.

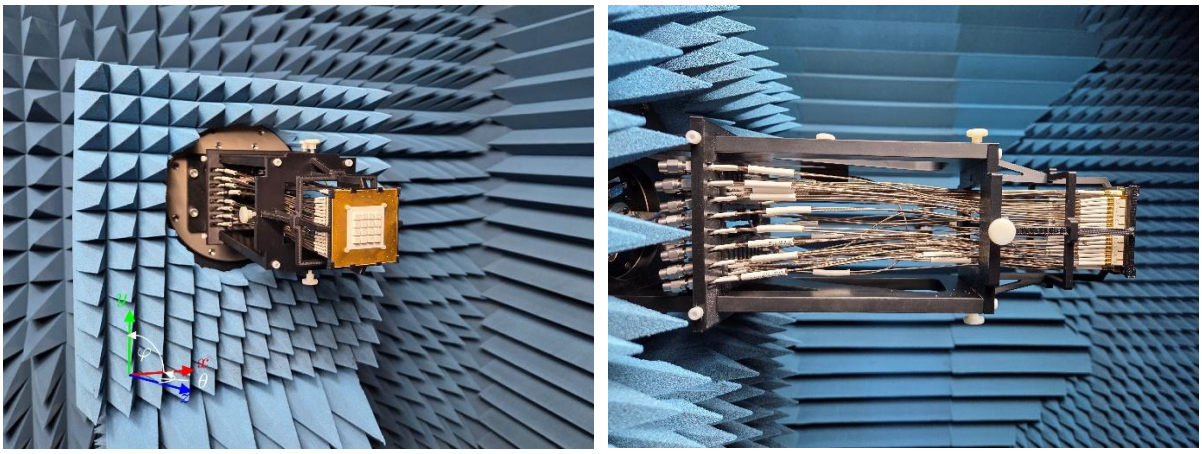
Nach erfolgreicher Charakterisierung der Einzelelemente wurde der vollständige Array-Demonstrator auf Basis der entwickelten M³PA-Struktur untersucht. Das Array besteht aus 16 Antennenelementen in einer 4×4-Anordnung und wurde für den Einsatz im 28 GHz-Mobilfunkband (Band n257) ausgelegt. Die gewählte Arrayarchitektur ermöglicht eine hohe Anzahl unabhängiger Freiheitsgrade und dient als Forschungsplattform zur Untersuchung neuartiger Beamforming- und Strahlschwenkverfahren.

Der gefertigte 4×4-M³PA-Array-Demonstrator ist in Abb. 17 dargestellt. Zur Verifikation der Antennen-Performance wurde das vollständige Array anschließend in der Antennenmesskammer der LUH vermessen.



(a) (b)

Abb. 17: Aufgebauter mmWave 4x4 M³PA-Array-Demonstrator. (a) Frontansicht. (b) Rückansicht.



(a) (b)

Abb. 18: Aufgebauter 4x4-M³PA-Array-Demonstrator in der Antennenmesskammer von LUH. (a) Vorderansicht. (b) Rückansicht mit verbundenen Anschlusskabeln und Terminierungen.

Hierzu wurden die im Rahmen von AP3 entwickelten Beamforming-Gewichte auf die einzelnen M³PA-Ports angewendet und die resultierenden Strahlungscharakteristiken messtechnisch erfasst. Der Messaufbau zur Verifikation der Strahlungseigenschaften des M³PA-Arrays ist in Abb. 18 dargestellt. Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit des Ansatzes wurde insbesondere die Strahlschwenkung über große Winkelbereiche untersucht. Die resultierenden Array-Richtcharakteristiken sind in Abb. 19 dargestellt.

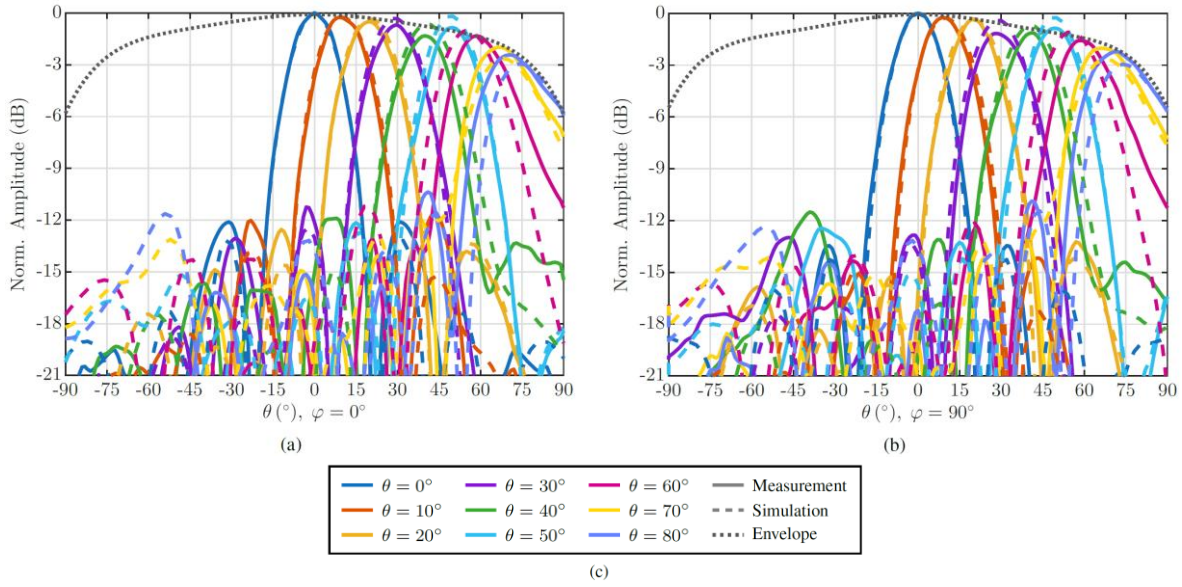


Abb. 19: Vergleich zwischen den gemessenen und simulierten geschwenkten Richtcharakteristiken für verschiedene Schwenkwinkel. (a) Horizontal geschwenkte Richtcharakteristiken. (b) Vertikal geschwenkte Richtcharakteristiken. (c) Legende.

Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung und bestätigen die Eignung des entwickelten Moden-Beamforming-Ansatzes für die Strahlschwenkung im Millimeterwellenbereich. Es konnte hierdurch gezeigt werden, dass durch die Nutzung mehrerer charakteristischer Moden innerhalb der Antennenelemente eine deutliche Erweiterung des nutzbaren Schwenkbereichs gegenüber konventionellen Antennenarrays erzielt werden kann. Während klassische Arrays bei großen Schwenkwinkeln häufig unter einer deutlichen Gewinnminderung oder dem Auftreten von

Grating Lobes leiden, ermöglicht die modengewichtete Strahlformung eine gezielte Anpassung der Elementcharakteristiken an die gewünschte Abstrahlrichtung.

Die Untersuchungen zeigen, dass eine Strahlschwenkung bis zu Winkeln von etwa ±77° ohne das Auftreten sichtbarer Grating Lobes realisiert werden kann. Damit konnte experimentell nachgewiesen werden, dass die zusätzlichen Freiheitsgrade der M^{3}PA-Architektur zur Erweiterung des nutzbaren Sichtfelds eingesetzt werden können. Dies stellt einen wesentlichen Vorteil für zukünftige Kommunikations- und Sensing-Systeme dar, da insbesondere ISAC-Anwendungen von großen Sichtfeldern und einer flexiblen Strahlformung profitieren.

Zusammenfassend konnte durch die experimentellen Untersuchungen die praktische Realisierbarkeit des entwickelten M^{3}PA-Array-Konzepts nachgewiesen werden. Die gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung sowie die erfolgreiche Demonstration der großwinkligen Strahlschwenkung bestätigen die Eignung des Ansatzes für zukünftige Mobilfunksysteme mit integrierter Kommunikations- und Sensing-Funktionalität.

5 Ergebnisse des Teilvorhabens

5.1 Erreichung der Ziele des Teilvorhabens

Ziel des Teilvorhabens war die Untersuchung und Entwicklung neuartiger Antennen- und Front-End-Konzepte für zukünftige Mobilfunksysteme mit integrierter Kommunikations- und Sensing-Funktionalität (Integrated Sensing and Communication, ISAC). Hierzu sollte insbesondere das Potenzial von Multi-Mode Multi-Port Antennen (M^{3}PA) zur Realisierung entkoppelter Antennentore sowie zur Erweiterung der Freiheitsgrade für Beamforming- und Sensing-Anwendungen untersucht werden.

Im Rahmen des Vorhabens konnten die angestrebten Forschungsziele weitgehend erreicht werden. Es wurden neuartige M^{3}PA-basierte Antennenkonzepte für den Millimeterwellenbereich entwickelt und hinsichtlich ihrer Eignung für zukünftige ISAC-Systeme analysiert. Durch die Anwendung der Theorie charakteristischer Moden konnten zusätzliche modale Freiheitsgrade identifiziert und für die Strahlformung nutzbar gemacht werden. Aufbauend auf diesen Untersuchungen wurden Verfahren zur modengewichteten Strahlformung entwickelt, welche die gezielte Anpassung der Elementcharakteristiken an unterschiedliche Strahlschwenkwinkel ermöglichen.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Entwicklung und Realisierung eines M^{3}PA-basierten Antennenarrays für den Frequenzbereich um 28 GHz. Die entwickelte Arrayarchitektur integriert mehrere entkoppelte Antennen-Ports innerhalb eines gemeinsamen physikalischen Antennenelements und stellt damit zusätzliche Freiheitsgrade für Kommunikations- und Sensing-Anwendungen bereit. Die Arbeiten leisten somit einen Beitrag zur hardwareseitigen Integration von Kommunikations- und Sensing-Funktionen in zukünftige Mobilfunksysteme.

Die entwickelten Konzepte wurden durch den Aufbau von Demonstratoren sowie umfangreiche Messungen experimentell validiert. Die Messergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit den zugrunde liegenden Simulationen und bestätigen die praktische Realisierbarkeit des vorgeschlagenen Ansatzes. Insbesondere konnte eine Weitwinkel-Strahlschwenkung ohne das Auftreten sichtbarer Grating Lobes nachgewiesen werden. Damit wurde gezeigt, dass die zusätzlichen Freiheitsgrade der M^{3}PA-Architektur zur Erweiterung des nutzbaren Sichtfelds eingesetzt werden können und somit ein vielversprechender Ansatz für zukünftige ISAC-Systeme darstellen.

Zusammenfassend konnten die im Teilvorhaben formulierten Ziele hinsichtlich der Entwicklung, Realisierung und experimentellen Validierung neuartiger M^{3}PA-basierter Antennen-Konzepte erfolgreich erreicht werden. Die erzielten Ergebnisse bilden eine Grundlage für die weitere Erforschung integrierter Kommunikations- und Sensing-Systeme im Kontext zukünftiger 6G-Mobilfunknetze.

5.2 Zusammenwirken der Arbeitspakete

Die Arbeiten der LUH erstreckten sich über mehrere Arbeitspakete und bildeten eine durchgängige Entwicklungskette von der Anforderungsanalyse über die Entwicklung technischer Lösungsansätze bis hin zur experimentellen Validierung. Das Zusammenwirken der einzelnen Arbeitspakete war dabei wesentlich für die erfolgreiche Umsetzung des Teilvorhabens.

Die Arbeiten in AP2 bildeten die Grundlage für die technische Entwicklung in AP3. Im Rahmen der Diskussion von Anwendungsfällen sowie architektonischen und technischen Randbedingungen wurden Anforderungen an zukünftige Kommunikations- und Sensing-Systeme identifiziert und hinsichtlich ihrer praktischen Umsetzbarkeit bewertet. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse flossen unmittelbar in die Auslegung der Antennen- und Front-End-Konzepte ein.

Aufbauend auf diesen Anforderungen wurden in AP3 neuartige Antennenkonzepte auf Basis von Multi-Mode Multi-Port Antennen (M^{3}PA) entwickelt und untersucht. Neben der Analyse charakteristischer Moden und der Entwicklung geeigneter Beamforming-Verfahren wurden Konzepte für die hardwareseitige Integration von Kommunikations- und Sensing-Funktionalitäten erarbeitet. Die Ergebnisse dieses Arbeitspakets bildeten die Grundlage für die Realisierung der Demonstratoren.

Die in AP3 entwickelten Antennenstrukturen und Verfahren wurden anschließend in AP6 praktisch umgesetzt und experimentell validiert. Hierzu wurden Demonstratoren gefertigt, messtechnisch charakterisiert und mit den zugrunde liegenden Simulationen verglichen. Die experimentellen Untersuchungen bestätigten die in AP3 entwickelten Modelle und zeigten die praktische Realisierbarkeit der vorgeschlagenen Konzepte.

Insgesamt entstand durch das Zusammenwirken der Arbeitspakete eine konsistente Entwicklungskette, welche von der Anforderungsdefinition über die Entwicklung

neuartiger Antennen- und Front-End-Konzepte bis hin zu deren experimenteller Verifikation reicht. Dadurch konnten die angestrebten Beiträge zur Integration von Kommunikations- und Sensing-Funktionalitäten in zukünftige 6G-Mobilfunksysteme erfolgreich erarbeitet und nachgewiesen werden.

5.3 Demonstratoren und Validierungsergebnisse

Zur Validierung der im Rahmen des Teilvorhabens entwickelten Antennen-Konzepte wurden mehrere Demonstratoren auf Basis von Multi-Mode Multi-Port Antennen (M^3PAs) aufgebaut und experimentell untersucht. Die Demonstratoren dienten dazu, die entwickelten Entwurfsverfahren, die zugrunde liegenden Modelle sowie die vorgeschlagenen Beamforming-Konzepte unter realen Bedingungen zu verifizieren.

Zunächst wurde die Funktionalität der entwickelten M^3PA-Einzelelemente nachgewiesen. Die experimentellen Untersuchungen bestätigten die erfolgreiche Anregung der vorgesehenen charakteristischen Moden sowie die gute Übereinstimmung zwischen den simulierten und gemessenen Strahlungscharakteristiken. Darüber hinaus konnte die Eignung des entwickelten Antennenkonzepts zur Realisierung mehrerer entkoppelter Antennentore innerhalb eines gemeinsamen physikalischen Strahlers bestätigt werden.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Einzelelementuntersuchungen wurde ein vollständiger 4×4-M^3PA-Array-Demonstrator für den Frequenzbereich um 28 GHz realisiert. Die Messungen des Demonstrators bestätigten die praktische Umsetzbarkeit der entwickelten Hardwarearchitektur sowie die erfolgreiche Integration der Antennenelemente, Speisestrukturen und Beamforming-Konzepte in einer gemeinsamen Plattform.

Ein wesentlicher Schwerpunkt der Validierung lag auf der experimentellen Untersuchung der Strahlschwenkeigenschaften des entwickelten Arrays. Die Messergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den zuvor durchgeführten EM-Simulationen und bestätigen die Wirksamkeit des entwickelten modalen Beamforming-Ansatzes. Insbesondere konnte nachgewiesen werden, dass die zusätzlichen Freiheitsgrade der M^3PA-Architektur zur gezielten Anpassung der Elementcharakteristiken genutzt werden können.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass mit dem entwickelten Array eine Strahlschwenkung bis zu Winkeln von etwa ±77° ohne das Auftreten sichtbarer Grating Lobes realisiert werden kann. Damit wurde experimentell nachgewiesen, dass die Kombination aus M^3PA-Antennen und modengewichteter Strahlformung eine deutliche Erweiterung des nutzbaren Sichtfelds gegenüber konventionellen Antennenarrays ermöglicht.

Die Demonstratoren bestätigen somit die grundsätzliche Eignung des entwickelten Ansatzes für zukünftige Kommunikations- und Sensing-Systeme. Insbesondere zeigen die Ergebnisse, dass die zusätzlichen modalen Freiheitsgrade von M^3PA-Antennen einen

vielversprechenden Ansatz zur Realisierung leistungsfähiger Antennen-Front-Ends für zukünftige ISAC-Systeme darstellen.

6 Verwertung und Transfer

6.1 Wissenschaftliche Verwertung

Die im Rahmen des Teilvorhabens erzielten Ergebnisse leisten einen Beitrag zur Erforschung zukünftiger Mobilfunksysteme mit integrierter Kommunikations- und Sensing-Funktionalität (Integrated Sensing and Communication, ISAC). Insbesondere die entwickelten Konzepte für Multi-Mode Multi-Port Antennen (M^3PAs), die Untersuchung charakteristischer Moden von Aperturantennen sowie die entwickelten Verfahren zur modengewichteten Strahlformung stellen wissenschaftliche Beiträge im Bereich der Antennen- und Hochfrequenztechnik dar.

Die erzielten Erkenntnisse bilden eine Grundlage für weiterführende Forschungsarbeiten zur Integration von Kommunikations- und Sensing-Funktionen in zukünftigen 6G-Systemen. Insbesondere die Nutzung zusätzlicher modaler Freiheitsgrade innerhalb von Antennenarrays eröffnet neue Möglichkeiten für die Realisierung leistungsfähiger Beamforming- und Sensing-Verfahren. Die entwickelten Methoden und aufgebauten Demonstratoren bilden eine technologische und wissenschaftliche Grundlage für weiterführende Forschungsarbeiten sowie aufbauende Vorhaben im Bereich zukünftiger ISAC-Systeme.

Darüber hinaus ermöglichen die im Projekt aufgebauten Demonstratoren die experimentelle Untersuchung weiterführender Fragestellungen, beispielsweise hinsichtlich der Nutzung modaler Freiheitsgrade zur Verbesserung der Sensing-Leistung, der Entwicklung gemeinsamer Kommunikations- und Sensing-Verfahren sowie der Untersuchung neuartiger Antennenarchitekturen für den Millimeterwellenbereich.

Die im Projekt entwickelten Methoden, Simulationsmodelle und Hardwareplattformen werden auch über die Projektlaufzeit hinaus in Forschung und Lehre an der Leibniz Universität Hannover genutzt. Hierdurch wird eine nachhaltige wissenschaftliche Verwertung der erzielten Ergebnisse sichergestellt und deren Weiterentwicklung im Kontext zukünftiger Forschungsprojekte ermöglicht.

6.2 Veröffentlichungen, Vorträge und Wissenstransfer

Die im Rahmen des Teilvorhabens erzielten wissenschaftlichen Ergebnisse wurden kontinuierlich der Fachöffentlichkeit zugänglich gemacht. Hierzu wurden die Forschungsergebnisse in Form von Beiträgen auf nationalen und internationalen Fachkonferenzen präsentiert sowie in wissenschaftlichen Fachzeitschriften veröffentlicht.

Die Veröffentlichungen adressieren insbesondere die Entwicklung neuartiger Antennenkonzepte für Kommunikations- und Sensing-Systeme, die Analyse

charakteristischer Moden von Aperturantennen sowie die Untersuchung modengewichteter Beamforming-Verfahren für Multi-Mode Multi-Port Antennenarrays. Durch die Publikation der erzielten Ergebnisse wurde ein Beitrag zum wissenschaftlichen Austausch im Bereich zukünftiger 6G- und ISAC-Technologien geleistet.

Neben wissenschaftlichen Veröffentlichungen erfolgte die Präsentation der Projektergebnisse auf Fachkonferenzen und Workshops. Hierdurch konnten die entwickelten Konzepte mit Forschenden und Industrievertretern diskutiert sowie neue Impulse für weiterführende Forschungsarbeiten gewonnen werden.

Darüber hinaus wurden ausgewählte Demonstratoren und Forschungsergebnisse auf Messen und projektbezogenen Veranstaltungen präsentiert. Die Demonstrationen ermöglichten die anschauliche Vermittlung der entwickelten Technologien und unterstützten den Wissenstransfer zwischen Forschung, Industrie und weiteren Projektbeteiligten.

Eine vollständige Übersicht der im Rahmen des Teilvorhabens entstandenen Veröffentlichungen, Vorträge und Demonstrationen ist im Anhang dieses Berichts aufgeführt.

7 Fazit und Ausblick

7.1 Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse

Im Rahmen des Teilvorhabens wurden neuartige Antennen- und Front-End-Konzepte für zukünftige Mobilfunksysteme mit integrierter Kommunikations- und Sensing-Funktionalität untersucht, entwickelt und experimentell validiert. Der Schwerpunkt der Arbeiten lag auf der Erforschung von Multi-Mode Multi-Port Antennen (M^3PAs) als Grundlage für leistungsfähige Antennenarchitekturen in zukünftigen ISAC-Systemen.

Hierzu wurden charakteristische Moden von Aperturantennen analysiert und deren Potenzial für die Realisierung mehrerer entkoppelter Antennentore innerhalb eines gemeinsamen physikalischen Strahlers untersucht. Aufbauend auf diesen Arbeiten wurden neuartige M^3PA-basierte Antennenelemente sowie Verfahren zur modengewichteten Strahlformung entwickelt, die zusätzliche Freiheitsgrade für Beamforming- und Sensing-Anwendungen bereitstellen.

Die entwickelten Konzepte wurden durch den Aufbau von Demonstratoren im Millimeterwellenbereich praktisch umgesetzt und messtechnisch untersucht. Die Messergebnisse bestätigen die gute Übereinstimmung mit den zugrunde liegenden Simulationen und belegen die praktische Realisierbarkeit des entwickelten Ansatzes. Insbesondere konnte gezeigt werden, dass durch die Nutzung modaler Freiheitsgrade eine Strahlschwenkung bis zu Winkeln von etwa ±77° ohne sichtbare Grating Lobes ermöglicht wird.

Die erzielten Ergebnisse leisten einen Beitrag zur Erforschung zukünftiger 6G-Mobilfunksysteme mit integrierter Kommunikations- und Sensing-Funktionalität und zeigen das Potenzial von M^{3}PA-basierten Antennenarchitekturen für zukünftige ISAC-Anwendungen auf.

7.2 Offene Fragestellungen und zukünftige Arbeiten

Die im Rahmen des Teilvorhabens erzielten Ergebnisse zeigen das Potenzial von Multi-Mode Multi-Port Antennen (M^{3}PAs) für zukünftige Kommunikations- und Sensing-Systeme auf und eröffnen verschiedene Ansatzpunkte für weiterführende Forschungsarbeiten.

Ein Schwerpunkt zukünftiger Untersuchungen liegt in der Bewertung des Potenzials modaler Freiheitsgrade für Sensing-Anwendungen. Während im vorliegenden Vorhaben insbesondere die Auswirkungen auf die Strahlformung und die Erweiterung des nutzbaren Sichtfelds untersucht wurden, stellt die Analyse möglicher Verbesserungen hinsichtlich Winkelauflösung, Lokalisierungsgenauigkeit und Objekterkennung einen vielversprechenden Forschungsansatz dar.

Darüber hinaus sind weiterführende Untersuchungen zur gemeinsamen Optimierung von Kommunikations- und Sensing-Funktionen sowie zur Skalierung der entwickelten Konzepte auf größere Antennenarrays von Interesse. Die im Projekt erzielten Ergebnisse bilden hierfür eine wissenschaftliche Grundlage und unterstreichen das Potenzial von M^{3}PA-basierten Antennenarchitekturen für zukünftige ISAC-Systeme.

Literaturverzeichnis

[1] T. Wild, V. Braun, und H. Viswanathan, „Joint Design of Communication and Sensing for Beyond 5G and 6G Systems“, *IEEE Access*, Bd. 9, S. 30845–30857, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3059488.

[2] T. Wild, A. Grudnitsky, S. Mandelli, M. Henninger, J. Guan, und F. Schaich, „6G Integrated Sensing and Communication: From Vision to Realization“, in *2023 20th European Radar Conference (EuRAD)*, Sep. 2023, S. 355–358. doi: 10.23919/EuRAD58043.2023.10289474.

[3] A. Ghosh *u. a.*, „A Unified Future: Integrated Sensing and Communication (ISAC) in 6G“, *Antennas Propag. IEEE J. Sel. Top. Electromagn.*, Bd. 1, Nr. 1, S. 365–374, Sep. 2025, doi: 10.1109/JSTEAP.2025.3603540.

[4] R. Thomä, T. Dallmann, S. Jovanoska, P. Knott, und A. Schmeink, „Joint Communication and Radar Sensing: An Overview“, in *2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, März 2021, S. 1–5. doi: 10.23919/EuCAP51087.2021.9411178.

[5] B. Nuss, L. Sit, M. Fennel, J. Mayer, T. Mahler, und T. Zwick, „MIMO OFDM radar system for drone detection“, in *2017 18th International Radar Symposium (IRS)*, Juni 2017, S. 1–9. doi: 10.23919/IRS.2017.8008141.

[6] D. Manteuffel, F. H. Lin, T. Li, N. Peitzmeier, und Z. N. Chen, „Characteristic Mode-Inspired Advanced Multiple Antennas: Intuitive insight into element-, interelement-, and array levels of compact large arrays and metantennas“, *IEEE Antennas Propag. Mag.*, Bd. 64, Nr. 2, S. 49–57, 2022, doi: 10.1109/MAP.2022.3145714.

[7] N. Peitzmeier, T. Hahn, und D. Manteuffel, „Systematic Design of Multimode Antennas for MIMO Applications by Leveraging Symmetry“, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Bd. 70, Nr. 1, S. 145–155, Jan. 2022, doi: 10.1109/TAP.2021.3098610.

[8] T. Hahn und D. Manteuffel, „Enhanced Wide-Angle Steering with Multi-Mode Multi-Port Aperture Antenna Arrays“, 6. Juni 2026, *arXiv*: arXiv:2606.08320. doi: 10.48550/arXiv.2606.08320.

Anhang

A Veröffentlichungen

A.1 Fachzeitschriften

[J1] T. Hahn und D. Manteuffel, „Enhanced Wide-Angle Steering with Multi-Mode Multi-Port Aperture Antenna Arrays“, 6. Juni 2026, arXiv: arXiv:2606.08320. doi: 10.48550/arXiv.2606.08320. Eingereicht bei *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*.

A.2 Konferenzbeiträge

[C1] T. Hahn und D. Manteuffel, „Generation of a Square Multi-Mode Multi-Port Aperture Antenna by Selective Modal Excitation“, in *2024 18th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, März 2024, S. 1–4. doi: 10.23919/EuCAP60739.2024.10500996.

[C2] T. Hahn und D. Manteuffel, „Evaluation of the Beamforming Performance of a 4-Port Multi-Mode Antenna for Integrated Sensing and Communication Applications“, in *2024 54th European Microwave Conference (EuMC)*, Sep. 2024, S. 860–863. doi: 10.23919/EuMC61614.2024.10732667.

[C3] T. Hahn und D. Manteuffel, „Efficient S-Parameter and Far-Field Calculation of Symmetrical Multi-Port Antennas“, in 2025 19th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), März 2025, S. 1–4. doi: 10.23919/EuCAP63536.2025.10999875.

[C4] T. Hahn und D. Manteuffel, „On the Maximum Number of Orthogonal Ports in Antenna Arrays Based on Characteristic Modes“, in 2026 20th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Apr. 2026, S. 1–4.

B Messeauftritte und Demonstrationen

Datum	**Veranstaltung**	**Demo**
07/2024	Berlin 6G Konferenz 2024	Konzept-Präsentation: ISAC ermöglicht durch virtuell mehrlagige Multi-Mode Multi-Port Antennen (M^3PA)
07/2025	Berlin 6G Konferenz 2025	Demonstrator-Aufbau M^3PA-Antennen zur Anwendung in ISAC-Szenarien